EVOLUCION ESTRUCTURAL DE LOS ELEMENTOS PREFABRICADOS EN LOS ULTIMOS 50 AÑOS

Silva Midences Jorge [1]

RESUMEN

Se presenta la evolución de los elementos prefabricados y presforzados e influencia recibida en sus secciones transversales, comúnmente empleados en edificación y vivienda a través del tiempo hasta nuestros días.

Se destaca tanto la herencia de los primeros constructores como de innovaciones aportadas, algunas formas de dilucidar problemas, nuevos elementos estructurales e inventos, así como algunas patentes importantes.

ABSTRACT

This paper presents the evolutions of precast and prestressed elements and their cross sections influence for buildings and dwellings. It is emphasizes ancient constructor's heritage, materials until now days, some insight process and innovations, invents, new structural concrete elements and some historical patents.

¿QUÉ DEBEMOS A NUESTROS ANTECESORES?

ADOBE

En Egipto albañil y alfarero = *iqed*, derivado de una raíz cuyo significado era "moldear la tierra".
La paja se creyó importante para dar rigidez al adobe, o evitar rajaduras al secarse (ref. 1).

¿En qué difiere lo anterior con la práctica de hoy en día?

Un equipo de obreros haciendo adobes (ver figura 1). Dos llevan agua desde el estanque en grandes jarras, otro está de pie sobre una mezcla de barro y paja, mientras que otro llena con ella un molde de madera, que lo añade a la hilera de adobes secándose

Figura 1 . Iqued y...sistema de producción

CONCRETO LIGERO ESTRUCTURAL LWC

Los concretos ligeros se han usado desde tiempos antes de los romanos. Los primeros tipos fueron fabricados con piedra pómez de Grecia o Italia como agregado aligerante. En aquel entonces, eran de poca resistencia

[1] Staff del Director General PREMEX S.A. de C.V., González de Cossío 124, P.H., Col. Del Valle, 03110 México, D.F. Teléfono directo: (55)5768 3657; Fax: (55)5768-3657; jsmidences@yahoo.com

pero gran durabilidad como lo atestiguan antiguas estructuras en el Mediterráneo. Actualmente, exhiben resistencias comparables con el concreto de peso normal, pero 25-35% más ligero

Se reconoce a Stephen J. Hayden (ref. 2), de Kansas City, Missouri, U.S.A., como su inventor en 1918 (U.S.. patent No. 1255878).

Como suele suceder, empezó tratando de resolver un problema y terminó resolviendo otro de aún mayor importancia.

El eterno problema de la industria por siglos: la anormal expansión de algunos ladrillos con material de esquisto, cuando eran sujetos a altas temperaturas durante el proceso de cocción. Hayden visualizó que el material ligero expandido descartado, tenía características potenciales como agregado aligerante, y supuso la no conexión de celdas de aire producida por la formación y expansión de gases cuando es sujeta a altas temperaturas.

Su razonamiento, que reafirmó por experimentación, fue que un agregado de esa naturaleza podría substancialmente reducir la carga muerta de las estructuras de concreto y por consiguiente ayudar a apoyar tanto en costo como de ingeniería estructural.

Aplicaciones del LWC

Pisos en estructuras de acero (protección contra incendio)
Estructuras de concreto: edificios y estacionamientos (todos los tipos incluyendo pisos postensados)
Plataformas de puentes, pilares y vigas AASHTO.
Concretos con densidad específicas.
Elementos prefabricados y presforzados (trabes, doble T, paredes Tilt-Up, tuberías, ornamentos, etc.
Estructuras marinas, plataformas flotantes, barcos, plataformas petroleras.
De relleno y aislamiento.

CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

Desarrollado en Rusia (ref. 3), después de la Segunda Guerra Mundial, fue el Dr. Majardar (1960), quien aprovechó el Dióxido de Circonio en el Centro de Investigación de la Construcción de Inglaterra (BRE). Nace la industria del GRC ó GFRC (Glass Fiber Reinforced Cement).

1972. Impregnación del concreto con monómeros que posteriormente polimerizan dentro de su masa. Se obtiene incrementos muy notables en la resistencia mecánica (más de 200 N/mm².). Son prácticamente inatacables por la acción de los agresivos químicos o indestructibles en los ciclos hielo y deshielo, así como se mejora la relación resistencia/peso (ref. 4)

SIGLO XXI

The Bridge Street Bridge (ref. 5). 1er. puente vehicular de concreto en U.S.A., emplea tendones pretensados CRFP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) como principal refuerzo estructural y cables postensados CFCC (Carbon Fiber Composite Cable) en la parte inferior del alma de la viga.

Diseño Integral de Estructuras y Materiales (ISMD) (6). ECC - Engineered Cementitious Composites,
FRP - Fiber Reinforced Polymers, R/ECC – Reinforced ECC. (ver figura 2.)

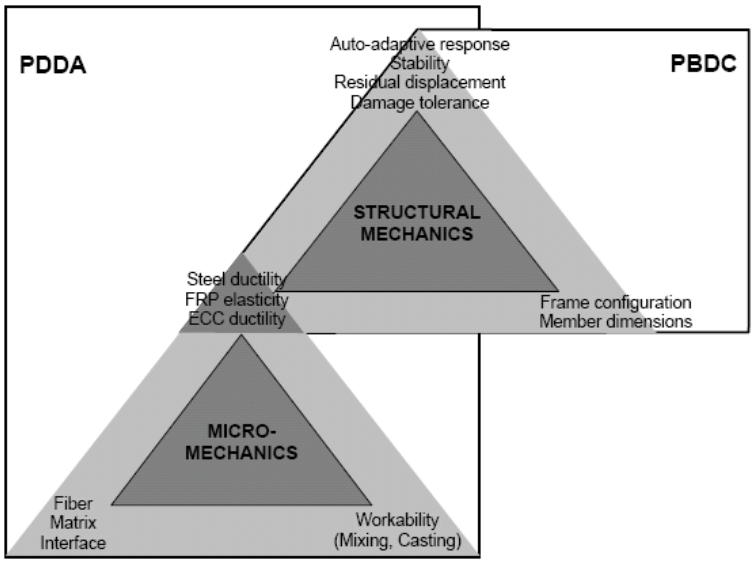


Figura 2

Este sistema planteado tendría un comportamiento bi-lineal elástico carga-deformación y capacidad de respuesta adaptativa.

Actualmente, en el Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, del IPN, (CIITEC-IPN), están desarrollando un sistema de recubrimiento de partículas en seco, que amalgama los elementos de manera más sólida, y garantiza tanto la utilización de al menos el 98 por ciento de los materiales empleados, como una alta resistencia y flexibilidad y con peso ligero. Un ejemplo de ello es el revestimiento de las moléculas de metal con algún tipo de cerámico y viceversa, con lo que es posible producir materiales resistentes al desgaste y abrasión, como la cerámica, pero con propiedades de resistencia mayores a ese componente.

Puente Sundoya en Noruega (ref. 3), a sólo 100 km., al sur del Círculo Ártico -**LWC** (ver figura 3.)

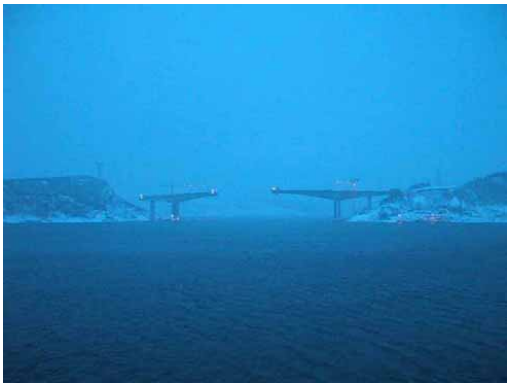


Figura 3

De tres claros, el principal de 298 m. y dos laterales de 120m. El claro principal será el 2o.más largo en el mundo para puentes de sección cajón postensado.

¿PATENTES?

Entre los ríos Tigris y Èufrates ahora conocida como Irak (ver figura 4.)

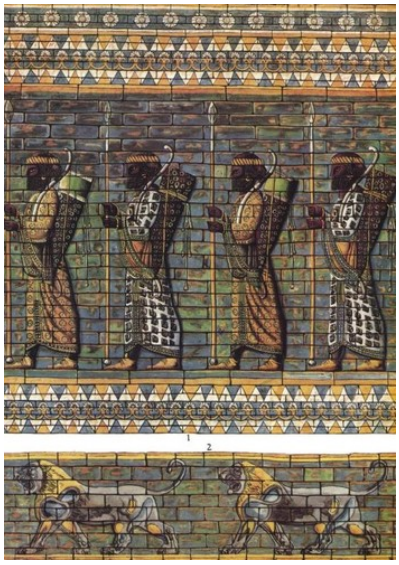


Figura 4. Palacio Real de Babilonia. 604 – 582 A.C..

"¿Secreto Industrial?". Sus fachadas fueron realizadas con un proceso de esmaltado de colores, que probablemente era con un líquido acuoso que se vitrificaba con la cocción Sólo podían haberlo descubierto tras un largo proceso de experimentación. Los Egipcios, en el año 1,500 A.C., no conocían el proceso de cocción para sus ladrillos y sólo se utilizó hasta la llegada de los Romanos.

Roma. ¿Para aligerar el peso de estructuras enormes? Ánforas vacías. Ingenio. En el Pantheon de Roma, la cúpula es de mampostería de ladrillo, ¿aligeramiento adicional? Conforme se acercaban a la parte alta, empezaron a utilizar casetones huecos. Asimismo, introdujeron la nervadura como tirante de sustentación (ref. 7)

HIERRO FUNDIDO

*"…su inclusión era el resultado de acciones correctivas de defectos de comportamientote la estructura.... se usó para tensores desde épocas antiguas……frecuentemente, se calentaba la barra en toda su longitud antes de fijarla, para que al enfriarse se acortara y quedara tensada" (*ref. 8*)*

Podríamos preguntar: ¿Postensado térmico? Y la respuesta es categórica. Antiguamente ya conocía y se aplicaba el postensado.

Con el arco de piedra atensorado se obtiene una solución estructural (ref. 9).

CONTEXTO EN LOS 1800`

El empiricismo del Siglo XVII (ref. 10), fue reemplazado primero por pruebas de carga a gran escala y cálculos tentativos y después, por pruebas a componentes (1850) aunado al análisis elástico y seguimiento de pruebas por control de calidad.

SECCIONES TRANSVERSALES

Por la madera como vigas, fue poco necesario considerar otras que no fueran de sección rectangular. El desarrollo que veremos, nos llevará a las actuales secciones transversales de miembros estructurales presforzados.

En 1826 Navier imparte cursos sobre resistencia de los materiales. Se contaba con la regla de Tredgold para una viga de hierro fundido, sección rectangular, longitud L y carga W

$$W = C.\ bd^2 / L$$

Donde C correspondía a un material en particular.

Asimismo, se puede apreciar (ver figura 5 siguiente):

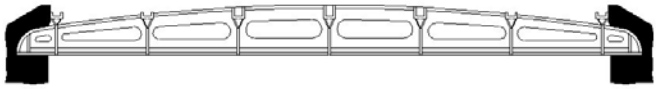


Figure 3 Cast iron girder spanning 12,5 metres in the floor of King's Library of British Museum: early 1820's by J.U. Rastrick.

Figura 5

En la figura inmediata anterior, (figura 5.) se observa este diseño en especial, de aquella época.

1839 Descontando la aparentemente empírica viga de hierro colado usada en el Palacio de Invierno en San Petersburgo la cual no tuvo gran influencia (ver figura 6.)

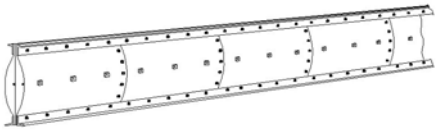


Figure 3 Tubular wrought iron beam for the Winter Palace, St. Petersburg of 1839

Figura 6

La forma tubular, de miembros sujetos a compresión, gradualmente evolucionó a la viga I simple de hoy (ref. 10). Se muestra algunos pasos de esta transición (ver figuras 7.)

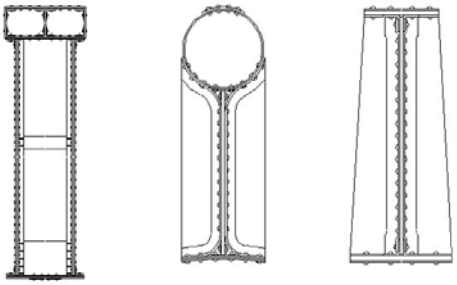


Figure 6 Evolution of riveted wrought iron beam from tubular form.

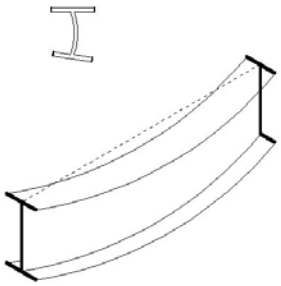


Figure 3 Geometric imperfections in cross-section and along the length of rolled sections (exaggerated)

Figuras 7

Desde la década de 1830`s la regla practica de Onwards fue confrontada por la “Sección ideal” de Eaton Hodgkinson para vigas I de hierro colado (ver figura 8).

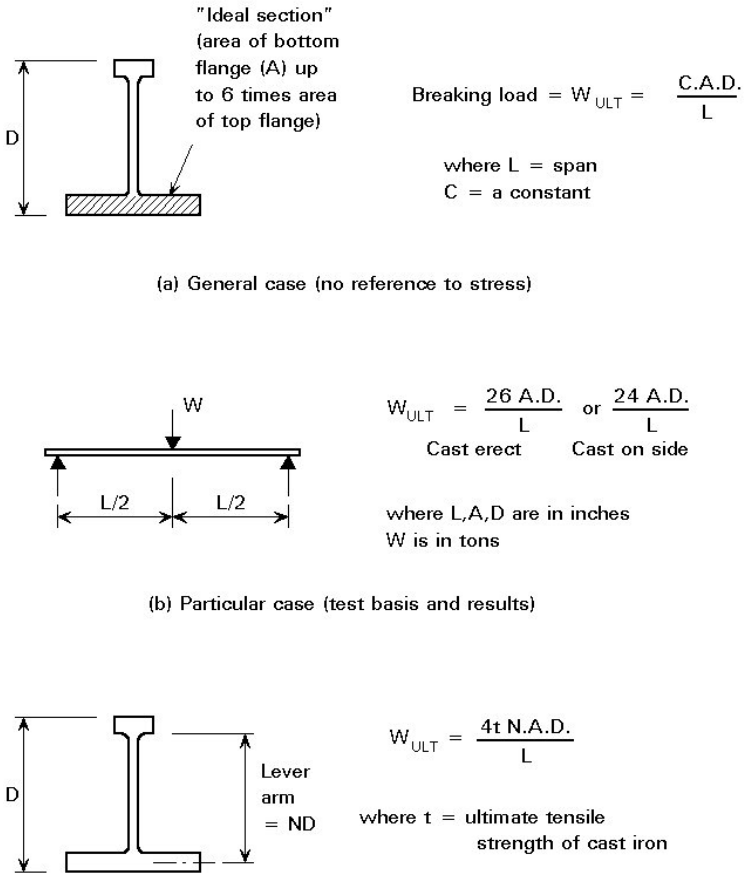


Figure 2 Eaton Hodgkinson's formula for the strength of cast iron beams of his "ideal section"

Figura 8

Asimismo, la sección transversal en vigas vio el desarrollo de la 1a. viga de sección T invertida (ref. 10)

COLUMNAS

Eaton Hodgkinson (ref. 10) también hizo estudios exhaustivos en columnas de hierro fundido y publicados en 1840. En la figura 9 siguiente, se aprecia las secciones transversales en boga.

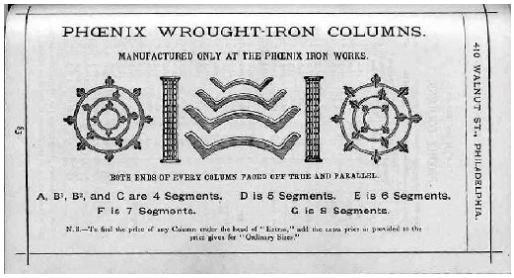

PHŒNIX WROUGHT-IRON COLUMNS.
MANUFACTURED ONLY AT THE PHŒNIX IRON WORKS.
410 WALNUT ST., PHILADELPHIA.
BOTH ENDS OF EVERY COLUMN FACED OFF TRUE AND PARALLEL.
A, B¹, B², and C are 4 Segments. D is 5 Segments. E is 6 Segments.
F is 7 Segments. G is 8 Segments.

Figura 9. Phoenix Iron Works, C.A. 1872

La sección I de columnas cambió por la sección circular hueca (circular hollow section) para aprovecharlo en desagüe de aguas pluviales o conducción de vapor (ver figura 10)

Figura 10

Este período de diseño estructural usando hierro se caracterizó más, por la evolución de formas que de nuevos sistemas.

SISTEMAS DE PISO

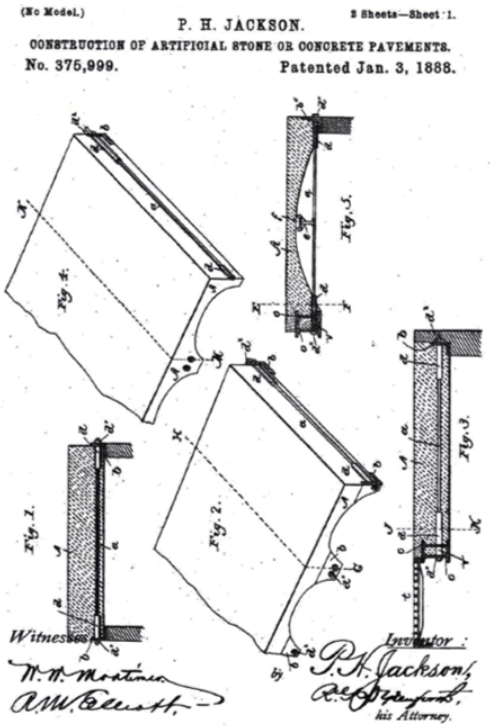
Fue usual construir pisos de terracota (ref. 10) en los cuales bloks huecos de terracota descansaban en patines inferiores de las vigas. Sirvieron también como protección contra incendio.

1846. La 1a. viga de hierro fundido fue rolada en Francia con el subsiguiente desarrollo de los sistemas de piso tales como *système vaux* y el *système thuasne.* Estas consistían en vigas de hierro fundido separadas 600-900 mm., c.a.c., conectadas por varillas de hierro colado con un cielo raso de yeso con espesor 70 mm., encajonado en la parte inferior de la viga.

EL PRESFORZADO

FINALES DEL SIGLO XIX

En enero 3 de 1888 P. H. Jackson, California, U.S.A., dio de alta en la Oficina de Patentes (ref. 11), un elemento constructivo a base de placas-arco, de concreto con cuerdas de acero como sujeción entre ellas, para funcionar como losa de pavimento. (ver figura 11)


(No Model.) 2 Sheets—Sheet 1.

P. H. JACKSON.

CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL STONE OR CONCRETE PAVEMENTS.

No. 375,999. Patented Jan. 3, 1888.

Fig. 1. Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4. Fig. 5.

Witnesses: Inventor: P. H. Jackson, by his Attorney.

Figura 11. Licence U. S. 375999

Meses después en ese mismo año 1888, C. F. W. Doehring (ref. 11), expuso claramente el concepto de la precompresión, concreto reforzado con acero previamente tensado antes de colar y hacerlo trabajar como losa o viga. Pero la aplicación práctica no tuvo éxito. Patente en Berlín (ver figura 12)

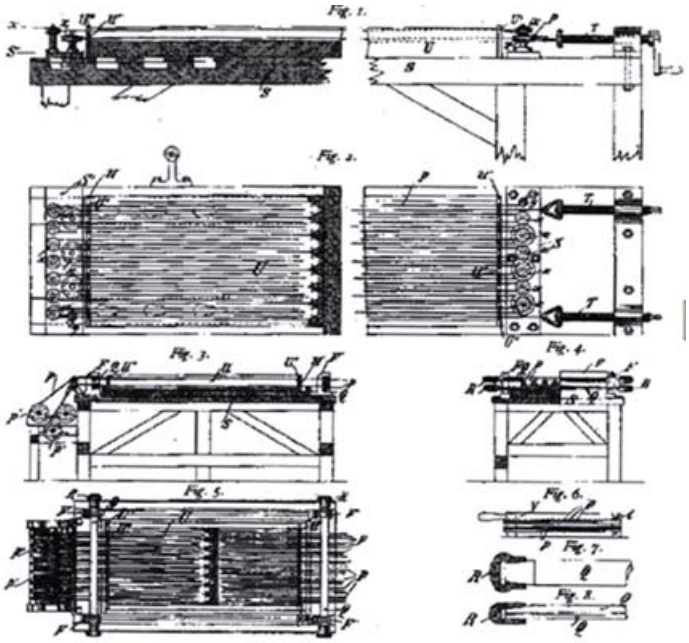


Figura 12. Patentschrift n. 53548, Einrichtung zur Herstellung von mit Draht…, Berlino, 1888

La diferencia estriba en que Doehring previó el colar después de tensado el concreto.

1889 Cottancin realiza sus primeros forjados nervados (ref. 10) y en Inglaterra, se construyen pisos de vigueta con relleno ('filler joist' floors), viguetas espaciadas unidas con concreto colado en sitio, y que vino a ser lo usual durante la primera parte del siglo XX.

En muchos aspectos estos pisos pueden ser vistos como precursores de los sistemas de piso mixtos y de concreto reforzado.

1891. Francois Coignet construye el primer forjado de vigas prefabricadas en Biarritz y en 1892 se instituye la Comisión Francesa para el Estudio del Cemento Armado.

SIGLO XX

1ª. DÉCADA

1901 – 1902. Aportación: E. L. Ransome patentó un sistema de banda exterior para sujeción de muros en pisos superiores de edificación. También desarrolló las primeras unidades de muros prefabricados instalados en pisos y columnas fabricadas in situ.

1903. 1er. Rascacielos de concreto. Con su sistema, E. L. Ramsome, torció varillas de sección cuadrada, estructurándolo con concreto en pisos y muros de concreto exterior. Edificio Ingalls, Cincinnati, Ohio, primer "rascacielos" de 15 niveles, construido por A. O. Elzner.

1906 Aportación: Paul Planat publica su tratado de construcción "L'Art de Bâtir", en que encontramos un sistema de forjado "El Boussiron" (ref. 10), consistente en bovedillas a modo de encofrado, sobre el que se colará de manera unitaria y de espesor requerido, el concreto en la zona entre nervaduras

1907 Durabilidad. La primera referencia que existe de estudios al respecto, trata sobre el comportamiento durante 20 años de probetas.

Asimismo, Koenen realizó ensayos en acero para el sector FFCC., a fin de evitar fisuración y oxidación. Por baja tensión del acero no se pudo compensar su pérdida de tensión, causada por la tracción y deformación plástica del concreto.

En 1909 Maillart patenta un método innovativo de construcción: la losa plana de concreto reforzado**.**

Es Eugene Freyssinet quién impulsa avance en las técnicas del presforzado desde los primeros años del siglo XX, experiencias que no habían fructificado por la falta de aceros de alta resistencia y concretos de alta calidad**.** Así, en 1910 Freyssinet:

- Empezó a experimentar con el deslizamiento del acero con respecto al concreto.
- Analizó el problema de relajación del acero.
- Propuesta de concretos de alta resistencia y estableció la tensión del acero en 10,000 kg/cm2.
- Desencofrado de arcos y realiza los primeros concretos pretensados.

Es probable que realmente su primera experiencia reveladora respecto a concretos y aceros de mayor resistencia, cuando al finalizar la construcción del puente Veurdre sobre el río Allier en 1910 y antes de realizar pruebas, (ver figura 13), el arco principal empezó a ceder. La responsabilidad de la integridad del puente recaía sobre sus hombros.

Figura 13. Destruido en 1940 durante la 2ª. Guerra Mundial.

DÉCADA DE LOS `20

1921/23. Freyssinet construye el hangar en el aeropuerto de Orly (Paris). Emplea el vibrado en la construcción de la lámina (ver figura 14)

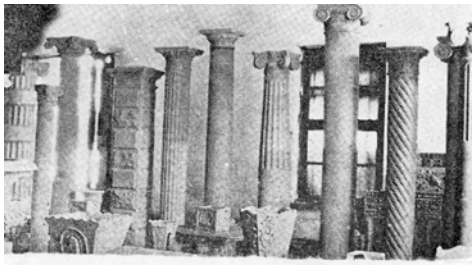
Figura 14

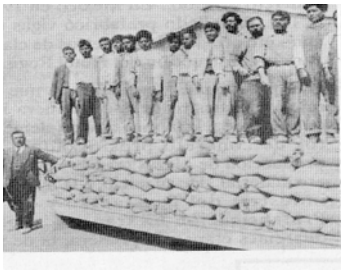
Aportaciones:
Bóvedas con nervaduras superiores,
Encofrados deslizantes,
Dispositivos a base de cuñas cónicas colocadas en los extremos de los cables que permitían el anclaje de los mismos y así ponerlos en tensión**.**

Los hangares de Orly se construyeron como cuerpos parabólicos doblados, con lo que eliminó la oposición entre pared y techo (ver figura 15)

Figura 15

1925 En México existían fábricas de productos con columnas de acuerdo al gusto del cliente (ref. 12) y la fábrica “La Cruz Azul” producía vigas I de concreto armado (ver figuras 16 y 17 respectivamente.)





Figuras 16 y 17.

En 1927 Rebolledo (25) elaboró elementos al pie de la obra, "in situ", para su fácil manejo y colocación de vigas de concreto armado de 14 m., de claro para la construcción del hotel Regis (ver figura 18)

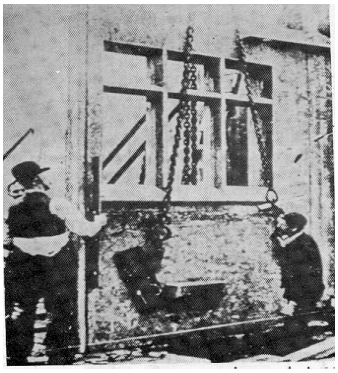


Figura 18.

Es hasta 1929, 40 años después de Doehring, cuando Freyssinet registra su primera patente en París y establece su teoría del concreto pretensado, lo que le había exigido…largos años de teoría y praxis (ver figura 19)

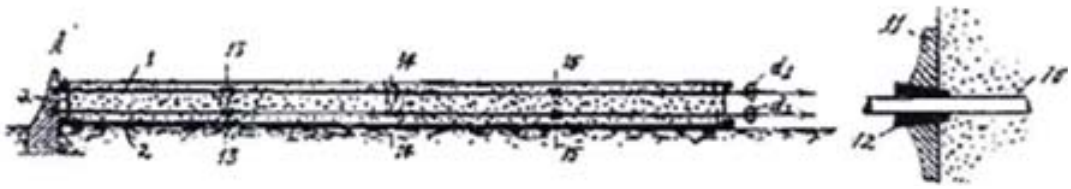


Figura 19. **E. Freyssinet, J. Seailles, Brevet d'Invention n. 680.547, Procédé de fabrication de pièces en béton armé, 2 ottobre 1929, Parigi, dettaglio del sistema di tensionamento dei cavi e del sistema di ancoraggio con piattello conico e cunei metallici.**

Es de justicia reconocer la colaboración y entrega de Jean Seailles en el desarrollo del presforzado durante todos esos años.

DÉCADA DE LOS `30

Aportación: Eugene Hoyer, a finales de los 30`s estudia el anclaje del acero por adherencia, mediante el empleo de alambres de alta resistencia: "cuerdas de piano", lo que dio por resultado mayor regularidad en la tensión del esfuerzo de pretensado. Sin embargo, ningún país de Europa se interesó en productos pretensados como negocio. …se necesitaba un método más práctico.

SOLUCIONES CREATIVAS A CONTRADICCIONES

Una contradicción aparece, cuando tratando de mejorar una propiedad deseable, otra se deteriora. Pensemos en la solución que se le dio a la siguiente contradicción:

Construir una losa que por un lado sea resistente, y por otro, sea ligera.

¿Restricciones conceptuales en la década de los '30? Recuérdese las opciones de aquel entonces: pisos de terracota, 'filler joist' floors, *système vaux*, *système thuasne*, y "El Boussiron".

Una solución encontrada posteriormente el siglo pasado, siglo XX, fue: emplear un material ligero, como bovedilla cemento-arena, de poliestireno o unisel, combinado con otros resistentes como el concreto y acero para lograr el efecto deseado. Tampoco en los años `30 se contaba con la metodología de Altshuller (1926-1998) – Sistema Triz (por sus siglas en ruso)- Acrónimo ruso de su teoría para la resolución de problemas inventivos**.**

Pero nos es claro el que: "...usted no puede pretender seguir haciendo siempre lo mismo y obtener resultados extraordinarios...".

Aportaciòn: Así pues, en los 30`s como aportación y cuya importancia sólo se apreciaría más adelante, los alemanes Schaefer y Kuen sentaron las bases para la fabricación de una losa muy parecida a la que hoy conocemos como *"losa alveolada o hueca" (hollow core)* (ref. 15). Esta losa (genéricamente denominada alveolada por sus huecos en forma de alvéolos pulmonares) estaba constituida de concreto de piedra pómez y dos lositas de concreto armado normal (ver figura 20)

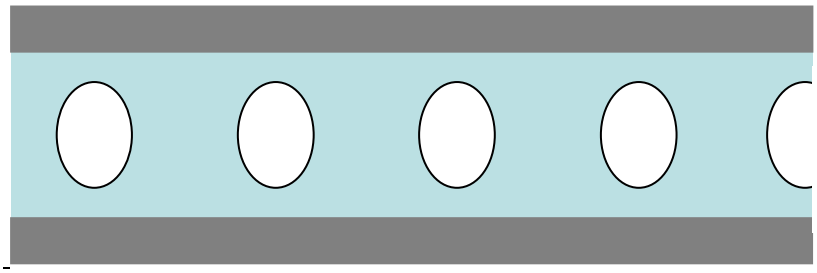


Figura 20

Los "noes" siempre son "alentadores" aunque son muy recomendables, necesarios y primordiales y si no los vemos, hay que buscarlos. ¿Pómez como los romanos?, ¿coeficiente de fricción entre capas?. Seguramente la búsqueda se orientaba al aligeramiento con material y alvéolos. La resistencia a tensión y compresión través del concreto armado normal. …ingenio, búsqueda, creatividad.

Pero su aportación tipo alveolar define zona de nervaduras y aligeramiento explícito.

DÉCADA DE LOS `40

En la década de 1940 recién se desarrolla el concreto pretensado, impulsado por la aguda escasez de acero en Europa, al finalizar la guerra y comenzar la reconstrucción**.**

1948. En España empezaron a emplearse los forjados con viguetas pretensadas. Se da el 1er acero de baja relajación desarrollado por John A. Roebling & Sons Co.

Asimismo, Raymond Concrete Pile Co. (posteriormente Raymond International) estaba ya, construyendo pilas de concreto presforzado para plataformas petroleras en el Golfo de México.

1949 1a. Cama de Pretensado: vigas en puentes por Concrete Products of America Co. (ver figura 21)

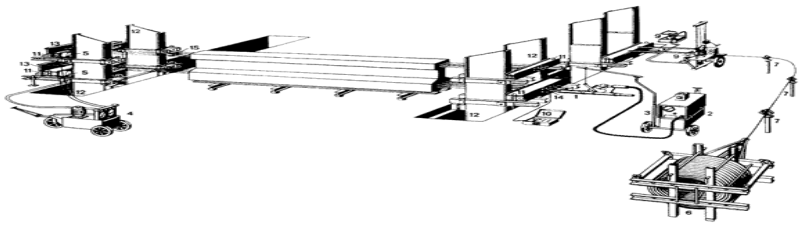


Figura 20 Esto requería experimentación y pruebas en el diseño del equipo.

En ese entonces ¿Cómo obtendríamos usted y yo, un acero de presfuerzo más efectivo?

"…la respuesta llegó en mayo de 1949 (ref. 13) después que Basking visitó una planta de prefabricados en Inglaterra, donde observó la fabricación de viguetas pretensadas de claro corto y cimbra usando alambres de 2 mm (0.076 in).

Aportación: Basking visualizó que si iba a tener éxito en elementos presforzados de claros largos requeriría de una manipulación probablemente tomando como analogía, los cables de cáñamo empleados por los barcos al atracar en los muelles. La respuesta fue lo que hoy conocemos como torones (ver figura 21)

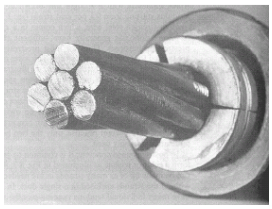


Figura 20

¿Cuál podría haber sido la "restricción" implícita? Tal vez la flexibilidad o en otras palabras, minimizó la "poca" flexibilidad de los alambres de acero comparada con el cáñamo.

¿Repercusiones? Esto se conectaría más adelante con lo aportado por Schaefer y Kuen, para el elemento estructural pretensado desarrollado Nagy cuatro años después, como veremos más adelante.

DÉCADA DE LOS `50

1949-1950. Puente Walnut Lane en Philadelphia; diseñado por Gustave Magnel, así como 1ª. aplicaciòn de tramos de vigas postensadas tanto en el puente Madison County Bridge y Estadio Fayetteville, Tennessee; (diseñado por Ross H. Bryan.) como en puentes del estado de Michigan U.S.A.; (diseñado por C. L. Johnson.).

1951. Primera aplicación de trabes presforzadas:
en edificios, Tulsa, Oklahoma. Se llega al campus universitario en U.S.A.: 1a. conferencia sobre concreto presforzado en el M.I.T.

1952. Aportación: Perlmutter, Altenberg y Sachter desarrollan y patentan la Doble T (Twin Tee, Double Tee o DT) en U.S.A.. Asimismo, la Doble T de 1.82 m (6 ft) de ancho es desarrollada por Prestressed Concrete of Colorado.

Se crea la F.I.P.. (Federación Internacional del Pretensado) en Cambrige.

Primer proyecto de edificación en Florida con losas presforzadas:
Belle Glade, Florida. ¿moldes?

La Doble T de 1.22 m (4 ft) de ancho es desarrollada en Florida por Harry Edwards.

1953. Aportación: Inicios de moldes de acero para camas de pretensado. Florida Prestressed Concrete Co. En U.S.A.

Aportación: Losa alveolar (Hollow Core Slab) es patentada como S*spancrete* por Henry Nagy in U.S.A., incorporando el torón.

1953 1954 -Puente Zaragoza, sobre el río Sta. Catarina, Ing. Dovalì Jaime y V. Guerrero y Gama y Puente Internacional sobre el río Bravo, Nuevo Laredo, Tx.

1954. 1as. Especificaciones sobre concreto pretensado: Harry Edwards, con base en la experimentación. En la planta de Arthur Anderson, Tacoma, Wa., se elabora concreto con cero revenimiento en una mezcladora horizontal.

1955 Desarrollo de vigas I pretensadas Std. de 7.6 a 18.3 m. (25 a 60 ft.). Principales generadores Bill Dean y Charles Zollman.

Primer Curso Nacional de Concreto Presforzado – Univ. de Florida y el PCI.

Llega a México el Sistema de Piso Aligerado (ver figura 21.)

Figura 21 Sist. De Piso: Vigueta Pretensada y Bovedilla cemento-arena.

Aportación: Losas Postensadas (ref. 14). Aunque ya se habìan construido antes algunas en Europa, el desarrollo se implementó en U.S.A., en 1955, y Australia. (ver figuras 22, 23 y 24)

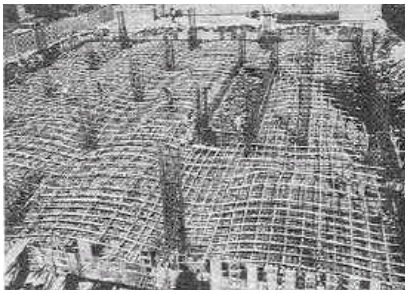


Figura 22. Losa de cimentación postensada.

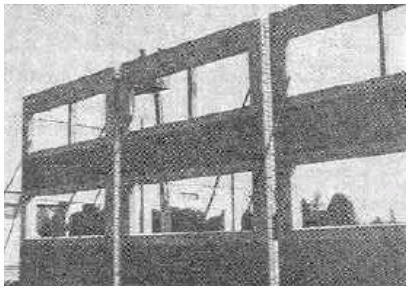


Figura 23. Elementos de fachada postensados.

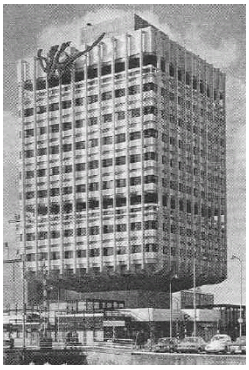


Figura 24 Edificio en voladizo postensado (14)

1956. Desarrollo en la AASHO (despues AASHTO) vigas I Std. (tipos I, II, III y IV); principal colaborador Bill Dean (ver figura 25)

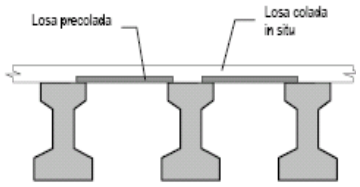


Figura 25 Viga I AASHTO

Todos asintieron con este enfoque excepto…

Art Anderson, quien escribió un artículo ácido (ref. 13), en Engineering News Record (ENR), y demostró que la viga Bulb T section es estructuralmente más eficiente que las vigas I.(ver figura 25)

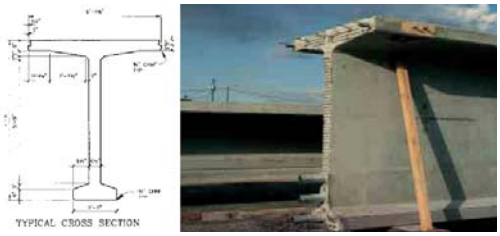


Figura 25 Viga Bulb T section

Efectivamente, hoy en día la viga Bulb T está reemplazando gradualmente a las antiguas secciones I std. AASHTO-PCI

1957. México: Puente sobre el río Tuxpan, ……..Puente sobre el río Coatzacoalcos, etc.

Ben C. Gerwick, Inc. produce un dispositivo deflector de cables.

1958. El Comité Conjunto ACI-ASCE 323 (posteriormente 423), publica recomendaciones tentativas para el concreto presforzado.

El PCI publica especificaciones para plantas de presforzados.

1a. prueba con fuego en una viga Doble T por U. L Inc.

1959. Desarrollo de la viga Bulb-T por Arthur Anderson de Concrete Technology Corp., Tacoma, Wa.

El TAC publica el Código Standard en Edificación con Concreto Presforzado.

Como marco de referencia cronológico:

TAC "The Architects Collaborative" fundada en 1946, después de la 2ª. Guerra Mundial.

1a. edición registrada del UBC es de 1967.

The International Code Council (ICC) fundada en 1994.

Y tenemos nuestra Norma Mexicana NMX – C 406 - 1997 – ONNCE.

DÉCADA DE LOS ´60

CAFCE: Arq. Ramírez Vázquez (ref. 11), Zapatas, Columnas Prefabricadas y Sistema de Losa con Canaletas (ver figuras 26 y 27)

Figura 26

Figura 27 Montaje de trabes I sección variable para aulas

1962 La empresa Ordic (ref. 12), construyó un conjunto habitacional en San Juan de Aragón, D.F., 900 casas-habitación, empleando una planta prefabricadora "in situ" (ver figura 28)

Figura 26

México. El M. en C. Humberto J. Benet, publica su “Manual de Diseño de Losas Planas de Concreto Armado Aligeradas con Tubos de Cartón Comprimido”, SONOVOID ®.

1963. ACI 318-63 Building Code …reconoce el concreto presforzado.

1968. El PCI promueve el concepto de Sistemas de Edificación.

Asimismo, el PCI y la AASHTO revisan las ventajas de la Bulb-Tee y desarrollan las vigas I: tipo V y VI …pero eran demasiado pesadas (ref. 17).

1969. 1er. Sistema de Edificación Prefabricada presentada por Precast Systems, Inc.

DÉCADA DE LOS ´70

1972 1er: sobre vida útil, que se llevó a cabo en un concreto destinado a depósito de petróleo en el mar.

En México comienza la construcción de bodegas con trabes STT (ref. 11) y 1a. Estructura en Cuautitlán, Edo. de Mex. Jugos Mundet, diseño: Arq. Adolfo del Cueto (ver figura 27)

Figura 27

1975. Se construye la fábrica Meteoro (ref. 11), del Ing. Carlos González Flores.

Figura 28

Primeras Dobles T en México (ref. 11). Montaje del edificio central de ICA (ver figura 29)

Figura 29

En México el desarrollo ha sido fructífero también en edificación y vivienda (ref. 16), hoteles y estacionamientos, desarrollos habitacionales, Investigación Experimental tanto en el CENAPRED, como en el Instituto de Ingeniería, UNAM, asimismo, innovaciones constructivas y aplicación exitosas de patentes.

¿EXPERIENCIAS EN USA?

Material Service Corp. en Chicago, (ref. 13), envió un equipo de técnicos y mercadólogos a la antigua Unión Soviética. Los rusos estaban en pleno programa de vivienda estatal y lo que más impresionó a los estadounidenses fue una viga ligera, cajón ancho. …regresando a Estados Unidos, desarrollaron un viga cajón de 4 celdas de 0.61 m de peralte x 2.44 m de ancho (24 in. x 8 ft.), alas de sólo 3.81 cm. (1 ½") in. *"dynacore"*...demasiado cara.

T. Y. LIN & Assoc., firma consultora: viga T de 0.92 m peralte x 2.44 de ancho (3 ft x 8 ft.) conocida por "Lin T". ...No sobrevivió a la prueba del mercado debido al ineficiente uso de materiales y mano de obra.

El Manual PCI 6ª. Edición contempla inicialmente las siguientes secciones (ver figura 30)

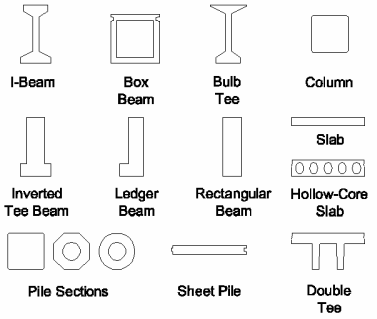


Figura 30

Desde los cimientos, podemos considerar los pilotes hincados de concreto presforzado, los "Candeleros" (ver figura 31 y 32)

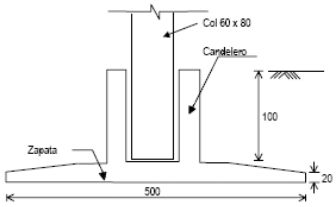


Figura 31

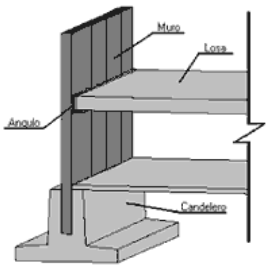


Figura 32

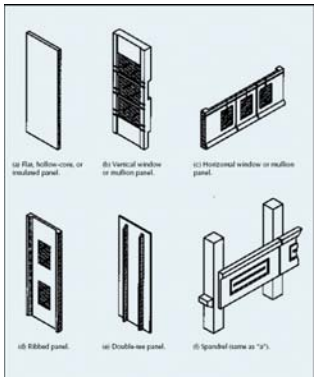
Columnas con ménsulas (ver figura 33)

Figura 33

Trabes pretensadas o prefabricadas (ver figuras 34)

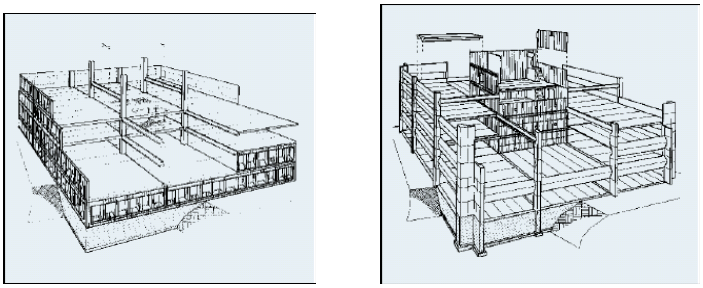
Figuras 34

Paneles de carga arquitectònicos (ver figura 35) de concreto prefabricados (ref. 18)



Figuras 34

Se ilustran Sistemas Exterior e Interior de muros diafragma respectivamente (ver figuras 35)



Figuras 35

DÉCADA DE LOS ´80

1985 viga New Florida Bulb-Tee de 3.66 m (12 ft.) de ancho desarrollada por High Concrete Structures, Inc., Denver, Pennsylvania

En 1987 el PCI la Bulb-Tee, la cual en mucho se asemejaba a la propuesta hecha por Art Anderson. …el mejoramiento en la producción y un mejor control de calidad lo hicieron posible (ref. 13)

Se introducen el *"room tunnel"* y el sistema de formación de concreto *"flex-form"* para paredes curvas (ver figura 36)

Figura 36

DÉCADA DE LOS ´90

En los 90`s se inicia la revolución computacional: herramientas de diseño estructural y arquitectónico abocadas a estas sofisticadas estructuras.

1990. Inicio en U.SA., del Programa de Investigación PRESSS (Precast Seismic Structural Systems), Multi-Million Dolars, a 10 Años.

1997. Se fabrica la viga Std. para puentes: New England Bulb-Tee (ver figura 37) Obsérvese patín inferior.

Figura 36

1998. México. El Ing. Rafael Betancourt Ribotta publica el 1er. *Manual Técnico- Losas Prefabricadas.*

SIGLO XX1

2002. Se implementa el concreto autocompactable en plantas de U.S.A. (ref. 15)

La Torre de Namur, Bélgica. Se da a conocer la estructura más alta de concreto prefabricado y presforzado en el mundo (ref. 20). Altura de 171 m. La estructura principal está compuesta por segmentos en forma de anillos de concreto prefabricado, empalmados con un mortero especial y postensados en su conjunto (ver figura 37)

Figura 37

Ingenio: algunas aportaciones del Dr. Englekirk (ref. 21)

Por años había estudiado el comportamiento de vigas fabricadas in situ, sujetas a deformaciones post sísmicas en un intento de predecir el comportamiento en los estados límites.

Hace unos 18 años, se le ocurrió que el mejor enfoque era el de evitar la principal acción causal del deterioro del concreto. Razonamiento: (concreto in situ). Sabemos que en las vigas de concreto puesto en sitio, se forma una zona de plastificación. (ver figura 38)

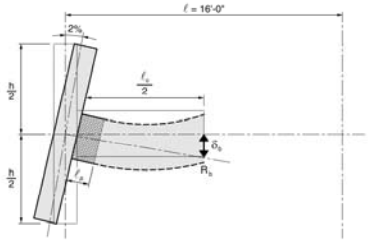


Figura 38

¿ Por qué no…

"mover" el segmento que cede de la viga al interior de la columna, como barra flexible que podría ser recomprimida sin daño al concreto?

En el sistema prefabricado se presentaría una separación entre viga y columna (ver figura 39)

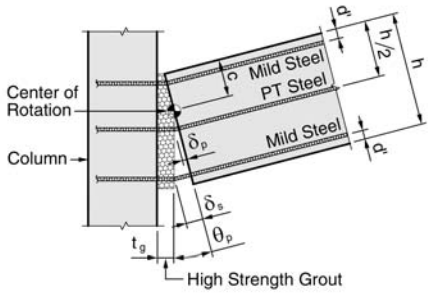


Figura 39

Este reformulación fue posible a través de una barra forjada dúctil ubicada desde la columna.

Dywidag Ductile Connector System (ref. 19) -DDC- (ver figura 40)

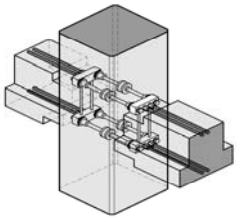


Figura 40

Otras aportaciones: Precast Hybrid Moment Resistance Frame System DDC y Sistema Híbrido Combinado (ver figuras 41 y 42)

Figura 41 Edificio de estacionamiento Wiltern 1995

Figura 41 Primera estructura construida utilizando un sistema antisísmico en concreto prefabricado en San Francisco U.S.A. The Paramount.

Aportación: Muro precomprimido y muro con disipadores de energía (ref. 22), desarrollados por José I Restrepo, Ph.D. Universidad de California, San Diego.

Aportación: Minehiro Nishiyama Fumio Watanabe†, presentaron (ref. 23) en el 2003: Conexión Prefabricada Columna-Cimiento para Desempeño Sísmico, Ensamblado con Postensado (ver figura 42)

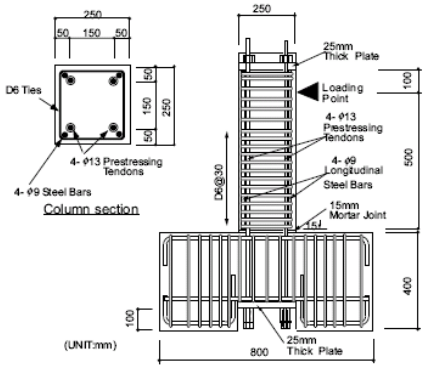


Figura 42

¿Motivación para nuestro amable lector?: R. Stephenson (ref. 10) construye el puente de hierro colado Britannia Bridge en 1850. 2 claros de 142 m centrales con 2 elementos rectangulares de 4.4 m de ancho y 9 m. de peralte. Destruido por el fuego en 1970 y reconstruido posteriormente como tipo arco (Ver figuras 43)

Figuras 43

Aportación: 100 años después, en 1951 A. Lipsky y L. Baes, (ref. 24) desarrollan la Preflex Beam, longitud típica: 33.4 m. (109 ft.) y posteriormente la Ronveaux Co. lanza la Flexstress Beam de longitud típica: 47 m. (154 ft.).

Construcción de la Preflex Beam:

a) En planta, coloque libremente apoyada, una viga I de acero combada en el plano vertical con una contra-flecha de 2.94 mm (11 ½ in)

b) Flexiónela aplicando dos cargas concentradas de 1854 kN (417 kips) a ¼ y ¾ del claro.

c) Cuele concreto de alta resistencia (HSC) hasta la parte alta del patín inferior. Conserve las cargas.

d) Siete días después remueva las cargas. La viga se enderezará y la contra-flecha será menor y el concreto estará sujeto a compresión.

e) Proceda al colado siguiente, ahogando completamente el patín superior. La sección transversal puede ser tipo T.

El sistema Flextress:

El concreto puede ser usando pretensión y la viga de acero A572 (S355), puede ser pretensada o con contra-flecha. En este último caso los esfuerzos residuales pueden ser eliminados con una serie de ciclos de carga / descarga al 85% del esfuerzo de fluencia.

Después, tendones externos actuando al nivel del patín inferior de la viga son conectados. El propósito de esta fase de carga ("turbo-preflexion") es incrementar la capacidad de combado de la viga.

Este precombado comprende la aplicación de dos cargas concentradas a ¼ y ¾ del claro. Al terminar esta operación, la viga es completamente ahogada en concreto.

Cuando la mínima resistencia del concreto es alcanzada, las dos cargas son quitadas y el presforzado (pretensando) es aplicado en el patín inferior.

Para incrementar la fuerza de presforzado que puede ser aplicado a la viga, un dispositivo anti-prestensado temporal (decompresiòn) se coloca arriba de la viga. Esta precaución es necesaria para el caso de que los soportes de la viga estén demasiado cerca durante el transporte lo que causaría momentos en voladizo.

El pretensado temporal es removido antes de colar la losa superior. Finalmente, después que esta losa ha alcanzado la resistencia necesaria, la viga compuesta es postensada.

Se hace necesario enfatizar que la Flextress no es simplemente la presencia de conocidas técnicas. Más bien es la innovativa combinación de dos principios básicos del pretensado y precombado. A saber, la aplicación del pretensado en el patìn inferior de la viga de acero (turbo-preflexion) y la decompresión temporal (antipretensado) en el concreto, junto con el completo ahogado de la viga durante la prefabricación.

Con esta innovativa combinación de conceptos (ref. 24), se construyen plataformas sección-U para vías del tren de alta velocidad en la Estación Sur de Bruselas, Bèlgica (ver figura 44).

Figura 44

Es importante cuanto sabe uno, pero también es importante…. qué hace uno con lo que sabe.

RECAPITULACIÒN

MATERIALES?

Neolìtico, Valle del Éufrates, Ladrillo crudo	7600 – 6000 A.C.
Cemento, el Faro de Smeaton (Eddystone)	1776
Dr. Fox, pavimentos c/armaduras de hierro	1829
Lambot “hormigòn armado”	1848
LWC, Stephen J. Hayden	1918
GFRC, Dr. Majardar	1960
Impregnación con monómeros	1972
CFCC, cables postensados	2002

¿2030?

SISTEMAS DE PISO

Su estructuración en castillos y palacios**:** travesaños de madera en un sentido, tablas en el otro sentido y etc.…

¿Función? *“...aumentar las distancias entre los muros de carga sin sacrificar la capacidad de resistencia de la construcción...” (R. Betancourt Ribotta).*

Variante de la losa maciza, (como una estructuración implícita de los travesaños de madera), podría considerarse las nervaduras, en un sentido o en ambos, aumentando el claro a cubrir.

¿Aligerando? Casetones o diversos materiales.

¿Olvidaremos los pisos de terracota, 'filler joist' floors, *système vaux, système thuasne*, y “El Boussiron”?. No lo fue al aparecer las viguetas pretensadas o de alma abierta, con bovedillas cemento-arena, poliestireno, casetón en arco de fibra de vidrio o metal, chapa troquelada incluyendo todos capa de compresión y conllevando el ahorro en cimbra de contacto con características térmicas, y acústicas según el caso.

Se tienen las losas postensadas, pero también el deseo de construir de “un solo golpe”, tableros completos prefabricados de los cuales algunos tipos hay todavía en el mercado. Una respuesta parcial pero efectiva la tenemos con la losa alveolar, doble T o inclusive con la T.

Los sistemas mixtos (ref. 25) línea clásica, vigas de acero con losa maciza sobre patín superior o bien vigueta pretensada – bovedilla apoyada usualmente en el patín inferior.

Aportación: Heberto Castillo: Sistema estructural de entrepiso tridimensional mixto de acero y concreto, "Tridilosa", versatilidad en edificios, puentes vehiculares y peatonales, presas hidráulicas, domos y como astillero flotante.

POR IMPULSAR EN MÉXICO

Losa Alveolar: "...El más internacional de los componentes prefabricados en el campo de la industrialización en la construcción mundial..". Razones técnicas, Económicas, Versatilidad. " ...elevado módulo elástico de al menos 1.5 veces el hormigón vertido *"in situ"* (ref. 26). "...resultan losas muy rígidas con flechas elásticas muy exiguas bajo las cargas de prueba...". "...se pueden realizar forjados con menor espesor a igualdad de luz y sobrecargas, respecto a otros forjados..."

HORIZONTE:

Más investigación: modelos experimentales.

Difusión del conocimiento, tecnología e investigación experimental hecha en México.

Viaducto Millau: *"…Entonces recurrieron a una técnica semejante a la empleada por los egipcios en la construcción de sus monumentos 4,000 años antes."* Editorial, Revista SMIE, Num. 6 / 2006

- Mayor eficiencia ingenieril considerando las estructuras con un enfoque sistémico.

- Teoría y praxis

- Equipo interdisciplinario,

- Herramientas computacionales,

- Investigación experimental,

- Posición ecléctica.

"…Siempre será objeto de creación, algún procedimiento constructivo, que requiere estudio y verificación analítica y experimental." Oscar de la Torre

Creatividad, Ingenio… Tecnología.

REFERENCIAS

1.- Amigos de Egiptología AE. Víctor J. Jiménez Jáimez. (2000) "**Materiales de construcción en el antiguo Egipto**", http://www.egiptologia.com/sociedad/materiales/materiales.htm

2.- Expanded Shale, Clay and Slate Institute, ESCSI. (2006), **"Literature and technical documents structural lightweight aggregate uses**" – Sección: "**Lightweight concrete and aggregates**", (ASTM 169C Chapter 46, 2006 (T.A. Holm and John P. Ries), Excellent overview of the complete subject. (ASTM 169D) http://www.escsi.org/, email: info@escsi.org

3.- Bridge. Design & Engineering, © Hemming Group Ltd. (2002), United Kingdom. **"Artículo"**, http://www.bridgeweb.com/magazine/ThisMonth.cfm

4.- Ian White. (2002), **"Cemento reforzado con fibra de vidrio en el siglo XXI"** , Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural ACHE, Primer Congreso Nacional de Prefabricación, España, 2002 (conferencista extemporáneo).

5.- Nabil F. Grace, Tsuyoshi Enomoto, George Abdel-Sayed, Kensuke Yagi, Loris Collavino. (2003), **"Experimental study and analisis a full-scale CFRP/CFCC double-tee bridge beam",** PCI paper, July-August 2003.

6.- Victor C. Li. (2001) **"Reinforced ECC - An evolution from materials to structures"**, Proceeding of the 1st FIB Congress, *Federation Internationale du Bèton*, FIB, Session 5, Composite Structures.

7.-Univ. Autónoma de Yucatán. **"Artículo"**, www.uady.mx/sitios/ingenier/hoy/arqui/roma1.htm.

8.- Roberto Meli. (1998), **"Ingeniería estructural de los edificios históricos",** 1a. Edición, Fundación ICA.

9.- Enrique Luis de Luca. (1979), **"Hormigón pretensado",** El Ateneo Editorial, p. 3

10.- KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, Department of Civil Enginnering. http://www.kuleuven.be/bwk/Home/index-E.html

11.- F. Leonhardt, Prestressed Concrete ones, (1964) "**Design and construction"**, Berlin, Cap. 20, traducción de C. Raccanello, F. Raccanello. (2000), "**Costruire… from the mattone to the precompresso one"**, thesis of bachelor, Iuav, Venice, reporter U. Barbisan, p. 87.
Adicionalmente: T. Y. Lin y Ned H. Burns. (1981), "**Design of prestressed concrete structures"**, John Wiley & Sons, Inc., E.U.A..

12.- Ing J. Carlos Delgado Trejo. (1997), **"La historia de la prefabricación",** Congreso ANIPPAC

13.- Norman I. Scott. (2004), "**Reflections on the early precast/presstresed concrete industry in America"**, PCI, Historical-Technical Series, PCI 50 Anniversary.

14.- Dr. P. Ritz, P. Matt, Ch. Tellenbach, P. Schlub, H.U. Aeberhard, (1985), "**Post-Tensioned Slabs"**, VSL International Ltd., 4.2 VSL Report Series.

15.- PCI. (2004), 1954-2004 "**Celebrating milestone of an industry and his organization"**, PCI 50 Anniversary.

16.- Asociación Nacional de Industriales del Presfuerzo y la Prefabricación A.C. ANIPPAC- Instituto de Ingeniería UNAM. (2000), "**Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas"**, 1a. Ed., Cap. 9.

17.- PCI. (2006), "**Handbook history"**, 6th Edition

18.- Sidney Freedman. **"Architectural Precast Concrete Services"** Precast/Prestressed Concrete Institute Chicago, Illinois.

19.- Fabiola Pierantoni Silva, José Penadés Martí. (2002), "**Elementos de obras singulares".** Sesión 6.5, Asociación Científico -Técnica del Hormigón Estructural, ACHE, Primer Congreso Nacional de Prefabricación, España.

20.- Guy Rigot, Marie-Thérese Gaspart. (1999), **"The tower at Namur - world´s tallest precast prestressed concrete dtructure"**, PCI Journal, Vol. 44, No. 3, May - June 1999, p 16-21.

21.- R. Englekirk. (2002), **"Beneficios y razones para usar sistemas estructurales de hormigón pre-fabricado en regiones de alta sísmicidad",** 2o. Seminario Internacional de Estructuras Prefabricadas en Zonas Sísmicas, ANIPPAC.

22.- José I. Restrepo. (2002), **"Beneficios y razones para usar sistemas estructurales de hormigón pre-fabricado en regiones de alta sísmicidad",** 2o. Seminario Internacional de Estructuras Prefabricadas en Zonas Sísmicas, ANIPPAC.

23.- Minehiro Nishiyama Fumio Watanabe†. (2003), **"Seismic performance of precast column-foundation connection assembled by post-tensioning"**, ECI Conference on Advanced Materials for Construction of

Bridges, Buildings, and Other Structures III, Davos, Switzerland, http://services.bepress.com/eci/advanced materials/5.

24.- Stèphanie Staquet, Guy Rigot, Henry Detant, Bernard Espion. (2004), **"Innovative composite precast prestressed precambered u-shape concrete deck for belgium`s high spedd railway trains",** PCI Journal, November-December 2004, p. 94-113.

25.- Jorge Silva Midences. (2005), **"Topología. sistemas de piso"**, 1er. Simposio de Sistemas de Piso, Universidad Veracruzana – Asociación Nacional de Industriales del Presfuerzo y Prefabricado A.C. ANIPPAC, (para catedráticos, Facultad de Ing.).

26.- Asociación de Productores de Losas Huecas Pretensadas ASSAP - Italia**. "La losa hueca. proyecto y utilizaciones"**, p. 3-5.